

STUDI ALIRAN DAYA DENGAN METODA NEWTON RAPHSON (Aplikasi PT. PLN Sumbar-Riau 150 KV)

Reri Afrianita⁽¹⁾, Heru Dibyo Laksono⁽²⁾

⁽¹⁾Jurusan Teknik Lingkungan, Universitas Andalas Padang, Kampus Limau Manis

⁽²⁾Jurusan Teknik Elektro, Universitas Andalas Padang, Kampus Limau Manis Padang, Sumatera Barat

Email : heru_dl@ft.unand.ac.id, rerianita@ft.unand.ac.id

ABSTRAK

Suatu sistem tenaga listrik terdiri dari banyak generator, transformator, elemen aktif dan pasif serta peralatan lainnya yang terinterkoneksi dalam jaringan transmisi antara beberapa buah atau bahkan beratus-ratus buah bus. Studi aliran daya sangatlah penting dalam perencanaan pengembangan suatu sistem untuk masa yang akan datang karena pengoperasian yang baik dari sistem tersebut banyak tergantung pada diketahuinya efek interkoneksi dengan sistem tenaga yang lain, beban yang baru, stasiun pembangkit yang baru serta saluran transmisi yang baru sebelum semuanya terpasang. Studi aliran daya menjamin bahwa sistem tenaga yang baru dapat memenuhi kebutuhan listrik secara ekonomis, efisien dan aman. Banyak metode yang digunakan untuk menyelesaikan masalah studi aliran daya dan salah satu metode yang dipergunakan dalam studi aliran daya ini adalah metoda Newton Raphson. Penerapan prosedur metoda Newton Raphson untuk perhitungan sistem besar akan dapat memberikan solusi untuk desain sistem, perencanaan dan pengembangan sistem tenaga di masa depan dan pengoperasian sistem tenaga dengan tingkat keamanan yang maksimum dan biaya operasi minimum

Keyword : Aliran Daya, Metoda Newton Raphson, Interkoneksi Sistem Tenaga Listrik

1. PENDAHULUAN

Suatu sistem tenaga listrik biasanya terdiri atas banyak generator, transformator, elemen beban aktif dan pasif serta peralatan yang terinterkoneksi dalam jaringan transmisi antara beberapa buah bus. Sistem tenaga listrik untuk menyuplai daya listrik aktif dan reaktif ke pelanggan yang berada di sepanjang jaringan secara andal, ekonomis dan berkesinambungan pada tingkat tegangan dan frekwensi tertentu. Hal ini harus dicapai juga dengan tiadanya unit pembangkit yang beroperasi pada kondisi beban lebih secara terus-menerus dan adanya jaringan transmisi yang memiliki rugi-rugi daya yang cukup besar.

Studi aliran daya dilakukan untuk mendapatkan informasi mengenai aliran daya dan tegangan sistem dalam kondisi operasi tunak. Informasi ini sangat dibutuhkan guna mengevaluasi unjuk kerja sistem tenaga listrik dan menganalisis kondisi pembangkitan maupun pembebanan baik kondisi normal maupun darurat. Alasan lain diperlukan studi aliran daya, ketika sistem tenaga listrik diperluas dengan menambah jaringan transmisi dan beban untuk memenuhi perkembangan kebutuhan tenaga listrik suatu daerah. Dengan studi semacam ini akan menjamin bahwa sistem tenaga yang baru dapat memenuhi kebutuhan listrik secara ekonomis, efisien dan aman.

Model sistem tenaga listrik yang digunakan dalam studi aliran daya terdiri atas unit pembangkit, elemen beban dan saluran transmisi yang masing-masing dihubungkan pada bus-bus dalam sistem tersebut. Dalam setiap bus terdapat empat besaran yaitu daya aktif (P), daya reaktif (Q), magnitudo tegangan ($|V|$) dan sudut fasa (θ). Selain itu pada studi aliran daya ini terdapat tiga buah tipe bus yang meliputi bus beban (PQ), bus pembangkit (PV) dan bus penadah (*slack bus*). Pada setiap bus minimal diketahui dua dari empat besaran yang ada. Setiap perhitungan harus dipilih salah satu bus sebagai bus penadah atau *slack bus*. Selain itu juga representasi model sistem tenaga selalu bertitik tolak dari single line diagram. Penggunaan single line diagram dalam studi aliran daya ini dengan asumsi sistem dianggap seimbang.

Hal yang terpenting dari studi aliran daya adalah penentuan besar tegangan (V) beserta sudut fasa (θ) dari setiap bus. Setelah mengetahui tegangan (V) dan sudut fasa (θ) setiap bus, perhitungan selanjutnya dilakukan untuk mencari daya aktif (P) dan daya Reaktif (Q) di setiap bus serta transmisi serta daya reaktif (Q) dari kapasitor statis atau reaktor-reaktor bus. Selain itu pula dapat juga diketahui rugi-rugi daya dalam MW dan MVAR serta ketidakserasian daya aktif (P) dan daya Reaktif (Q) pada setiap bus. Dimana ketidakserasian

ini merupakan suatu petunjuk tentang ketepatan suatu penyelesaian dan diperoleh dengan menghitung selisih daya aktif (P) dan biasanya juga daya reaktif (Q) yang masuk ke dalam dan meninggalkan masing-masing bus.

Untuk mendapatkan hasil yang diinginkan dalam studi aliran daya pada sistem tenaga listrik ini dikenal beberapa metoda antara lain metoda Gauss Seidel, metoda Newton Raphson dan metoda Fast Decouple. Dalam penelitian ini akan dibahas studi aliran daya dengan menggunakan metoda Newton Raphson dengan aplikasi : sistem Interkoneksi PT. PLN Sumbar-Riau 150 KV.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperkenalkan studi aliran daya dengan metoda Newton Raphson dan mengimplementasikan metoda Newton Raphson ini dalam suatu perangkat lunak (*software*) yang diaplikasikan pada sistem tenaga listrik PT. PLN Sumbar-Riau 150 KV.

Masalah studi aliran daya dalam sistem tenaga listrik memiliki ruang lingkup yang sangat luas, melihat hal tersebut maka perlu diadakan pembatasan masalah penelitian ini. Sesuai dengan judul penelitian ini, maka permasalahan yang dibahas adalah masalah-masalah yang menyangkut studi aliran daya dengan menggunakan metode Newton Raphson dan pembahasan tentang komponen sistem tenaga listrik yang berhubungan dengan studi aliran daya sistem tenaga listrik, dilakukan hanya untuk memperoleh persamaan matematika yang akan mewakili komponen tersebut dalam penyelesaian perhitungan aliran daya ini. Dengan demikian pembahasan mendetail dari setiap komponen tersebut tidak perlu diberikan dalam penelitian ini.

2. STUDI ALIRAN DAYA

Studi aliran daya adalah studi yang dilaksanakan untuk mendapatkan informasi mengenai aliran daya dan tegangan sistem dalam kondisi operasi tunak. Informasi ini sangat dibutuhkan guna mengevaluasi unjuk kerja sistem tenaga listrik dan menganalisa kondisi pembangkitan maupun pembebanan. Analisa ini memerlukan informasi aliran daya dalam kondisi normal maupun darurat.

Analisis aliran daya dalam sistem tenaga listrik memerlukan representasi atau pemodelan komponen sistem tenaga listrik. Suatu sistem kelistrikan tiga fasa yang seimbang selalu diselesaikan per fasa dan digambarkan dalam diagram satu garis yang sesuai dengan sistem tersebut. Tujuan diagram satu garis itu adalah untuk memberikan semua informasi yang diperlukan. Dalam berbagai kasus, diagram satu garis berbeda-beda sesuai dengan persoalan yang akan diselesaikan. Misalnya dalam studi aliran daya, beban-beban dan hambatan – hambatan seperti impedansi, resistansi dan induktansi harus digambarkan. Tempat netral ke tanah tidak perlu digambarkan. Sebenarnya pengabaian ini bertujuan

untuk menyederhanakan perhitungan terutama jika perhitungan dilakukan secara manual.

2.1 Representasi Sistem Tenaga Listrik

a. Generator Sinkron

Generator sinkron biasanya dihubungkan langsung ke busbar atau seringkali melalui transformator daya terlebih dahulu, karena tujuan dari studi aliran daya adalah untuk mengetahui besar tegangan busbar dan aliran daya, maka generator sinkron direpresentasikan sebagai suatu sumber daya aktif dan daya reaktif. Tegangan yang diperoleh adalah tegangan busbar dimana generator tersebut di sambung.

b. Transformator

Pada umumnya transformator dilengkapi dengan tapping yang dapat diubah-ubah, untuk mengatur atau mengubah tegangan busbar jika diperlukan. Perubahan posisi tap transformator menyebabkan faktor transformasi (a) berubah. Transformator seperti ini memiliki admitansi yang tidak sama bila dilihat dari kedua sisinya.

c. Saluran Transmisi

Untuk keperluan analisis dan perhitungan, maka diagram pengganti saluran transmisi dapat dibagi dalam tiga klasifikasi berdasarkan panjang saluran yaitu

1. Saluran Pendek (kurang dari 80 km)
Saluran transmisi dimana panjang saluran tersebut kira-kira kurang dari 80 Km maka saluran transmisi dikelompokkan pada saluran pendek. Pada saluran jenis ini efek kapasitansi parallel (shunt) nya sangat kecil sekali dan efek tersebut dapat diabaikan tanpa pengaruh yang berarti pada ketelitian perhitungan.
2. Saluran Menengah (antara 80 – 240 km)
Pada umumnya karakteristik saluran menengah ini tidak berbeda jauh dengan karakteristik pada saluran pendek. Efek kapasitansi pada saluran jenis ini harus diperhitungkan.
3. Saluran Panjang (lebih dari 240 km)
Untuk menganalisis saluran panjang diperlukan suatu ketelitian yang lebih baik. Harus diperhatikan bahwa parameter rangkaian sebenarnya tidak terpusat menjadi satu, melainkan tersebar secara merata di seluruh panjang saluran.

d. Kapasitor dan Reaktor Shunt

Dalam sistem tenaga listrik sering diperlukan kapasitor shunt dan reaktor shunt yang dipakai sebagai alat kompensasi pada saluran transmisi. Kompensasi diperlukan antara lain untuk

memperbaiki tegangan agar variasi tegangan tetap berada pada batas-batas yang diizinkan

Pada kondisi kebutuhan daya aktif dan daya reaktif yang cukup besar maka tegangan cenderung menurun melewati batas yang diizinkan. Oleh sebab itu untuk mengatasi kondisi yang demikian maka dipasang kapasitor shunt yang dapat menyuplai daya reaktif sehingga tegangan dapat naik kembali. Sebaliknya bila kebutuhan daya aktif dan reaktif sangat kecil maka pengaruh dari kapasitor akan menyebabkan naiknya tegangan di sisi penerima, melewati batas yang diizinkan. Pemasangan reaktor shunt akan menyerap pelepasan muatan dari kapasitansi saluran sehingga tegangan turun kembali. Kapasitor dapat direpresentasikan sebagai sumber daya reaktif atau sering sebagai impedansi

e. Beban (Load)

Ada tiga cara merepresentasikan beban dalam sistem tenaga listrik sebagai berikut :

1. Beban direpresentasikan sebagai daya konstan. Di sini daya nyata (MW) dan daya reaktif (MVAR) dianggap konstan. Representasi ini dipakai untuk studi aliran beban
2. Beban direpresentasikan sebagai arus konstan. Dalam hal ini arus beban dihitung sebagai berikut

$$I = \frac{P - jQ}{V^*} = I \angle (\theta - \phi) \quad (2.1)$$

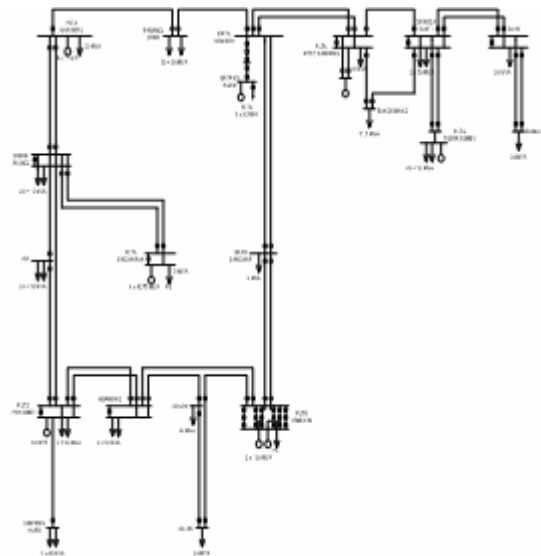
Besaran skalar (magnitude) dari arus I dijaga agar tetap konstan.

3. Beban direpresentasikan sebagai impedansi konstan. Kondisi ini sering dipakai untuk merepresentasikan beban dalam studi stabilitas. Bila daya nyata (MW) dan reaktif (MVAR) diasumsikan diketahui dan menjaga agar besarnya (*magnitude*) tetap konstan maka impedansi Z dapat dihitung sebagai berikut

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{|V|^2}{P - jQ} \quad (2.2)$$

2.2 Model Sistem

Dalam berbagai kasus, diagram satu garis berbeda-beda sesuai dengan persoalan yang akan diselesaikan. Misalnya dalam studi aliran daya, beban-beban dan hambatan – hambatan seperti impedansi, resistansi dan induktansi harus digambarkan. Tempat netral ke tanah tidak perlu digambarkan. Sebenarnya pengabaian ini bertujuan untuk menyederhanakan perhitungan terutama jika perhitungan dilakukan secara manual. Komponen-komponen dari suatu sistem tenaga listrik pada umumnya terdiri dari : pusat pembangkit, dalam hal ini yang digambarkan adalah generatornya., transformator daya, saluran transmisi, kondensator sinkron arus statis, alat pengaman (pemutus daya dan relai-relai) dan beban yang terdiri dari beban dinamik dan beban statis



Gambar 2.2 Diagram Segaris Sistem Tenaga Listrik 20 Bus (PT. PLN Sumbar-Riau)

2. METODA NEWTON RAPHSON UNTUK ALIRAN DAYA

Pada tahap awal, dilakukan penomoran bus terhadap sistem yang akan dianalisis. Bus-bus yang terhubung dengan generator diberi nomor terlebih dahulu setelah itu penomoran bus dilanjutkan pada bus-bus beban, bus yang memiliki kapasitas pembangkit terbesar dipilih sebagai *slack* bus dan diberi nomor 1 (satu), Untuk bus yang lain yang terhubung ke generator diberi nomor 2 (dua) sebagai bus pembangkit dan bus beban diberi nomor 0 (nol).

Menyusun data tentang sistem yang akan dianalisis yang meliputi data resistansi, reaktansi dan kapasitansi antara saluran, data tapping transformator, data beban terjadwal, data pembangkitan, asumsi awal magnitude tegangan dan sudut fasa tegangan bus. Perhitungan dimulai dengan membentuk impedansi jaringan (Z_{ij}) dengan rumus

$$Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij} \quad (3.1)$$

dimana

Z_{ij} : Impedansi jaringan antara bus i dan bus j

R_{ij} : Resistansi jaringan antara bus i dan bus j

X_{ij} : Reaktansi jaringan antara bus i dan bus j

kemudian impedansi jaringan dikonversi ke admitansi jaringan

$$Y_{ij} = Y_{r_{ij}} + jY_{x_{ij}} \quad (3.2)$$

dimana

$$Y_{r_{ij}} = \frac{R_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2}$$

$$Y_{x,ij} = \frac{X_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2}$$

Selanjutnya matrik admitansi bus Y dibentuk dengan komponen-komponen yang terdiri atas admitansi jaringan, kapasitansi saluran dan perubahan tapping transformator. Kemudian matrik admitansi bus Y yang terbentuk dalam bentuk rectangular dirubah ke dalam bentuk polar. Dimana sebelumnya matrik admitansi bus Y tersebut dipisahkan menjadi komponen matrik G dan matrik B. Daya terjadwal yang ada pada setiap bus dihitung dengan rumus

$$P_i^{jd} = P_{Gi} - P_{Li} \quad (3.3)$$

$$Q_i^{jd} = Q_{Gi} - Q_{Li} \quad (3.4)$$

dimana

P_i^{jd} : Daya aktif terjadwal

Q_i^{jd} : Daya reaktif terjadwal

P_{Gi} : Daya aktif pembangkitan

Q_{Gi} : Daya reaktif pembangkitan

P_{Li} : Daya aktif beban

Q_{Li} : Daya reaktif beban

Dalam proses iterasi dicari daya terhitung dengan rumus

$$P_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (3.5)$$

$$Q_i = - \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (3.6)$$

dimana

P_i : Daya aktif terhitung pada bus i

Q_i : Daya reaktif terhitung pada bus i

V_i, θ_i : Magnitude tegangan dan sudut fasa pada bus i

V_j, θ_j : Magnitude tegangan dan sudut fasa pada bus j

Y_{in}, θ_{in} : Magnitude dan sudut fasa elemen matrik admitansi Y

Mismatch daya dihitung dengan persamaan dibawah ini

$$\Delta P_i = P_i^{jd} - P_i^{hit} \quad (3.7)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{jd} - Q_i^{hit} \quad (3.8)$$

dimana

ΔP_i : Mismatch daya aktif bus ke I

ΔQ_i : Mismatch daya reaktif bus ke I

Setelah Mismatch daya dihitung maka selanjutnya membentuk matrik Jacobian

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & |V_2| \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \dots & |V_n| \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & H=J_1 & \vdots & \vdots & N=J_2 & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & |V_2| \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} & \dots & |V_n| \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & |V_2| \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \dots & |V_n| \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & M=J_3 & \vdots & \vdots & L=J_4 & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & |V_2| \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} & \dots & |V_n| \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

matrik Jacobian ini terdiri dari 4 submatrik yaitu submatrik H, N, M dan L atau dengan ekspresi yang lain J_1, J_2, J_3 dan J_4 . Untuk submatrik J_1 atau

H dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut

Untuk komponen *off diagonal*

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i V_j Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (3.10)$$

Komponen diagonal

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = \sum_{n=1, n \neq i}^N |V_i V_n Y_{in}| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (3.11)$$

Untuk komponen diagonal dengan membandingkan pada persamaan Q_i^{hit} diperoleh persamaan sebagai berikut

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -Q_i - |V_i|^2 B_{ii} \quad (3.12)$$

Untuk submatrik M atau J_3 dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut

Untuk komponen *off diagonal*

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i V_j Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (3.13)$$

Untuk komponen diagonal

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{n=1, n \neq i}^N |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) = \sum_{n=1, n \neq i}^N \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_n} \quad (3.14)$$

Untuk komponen diagonal M atau J_3 dengan membandingkan pada persamaan P_i^{hit} diperoleh persamaan sebagai berikut

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = P_i - |V_i|^2 G_{ii} \quad (3.15)$$

Untuk submatrik N atau J_2 dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut

Untuk komponen *off diagonal*

$$|V_j| \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_j| |V_i Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (3.16)$$

Untuk komponen diagonal

$$|V_i| \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} + 2|V_i|^2 G_{ii} = P_i + |V_i|^2 G_{ii} \quad (3.17)$$

Untuk komponen submatrik L atau J_4 dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut

Untuk komponen *Off diagonal*

$$\left| V_j \right| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = - \left| V_j \right| \left| Y_{ij} \right| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} \quad (3.18)$$

Untuk komponen diagonal

$$\left| V_i \right| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = - \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} - 2 \left| V_i \right|^2 B_{ii} = Q_i - \left| V_i \right|^2 B_{ii} \quad (3.19)$$

dimana

$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i}$ dan $\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j}$: Elemen dari submatrik $J_1 = H$

$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j}$ dan $\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i}$: Elemen dari submatrik $J_3 = M$

$\left| V_j \right| \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|}$ dan $\left| V_i \right| \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|}$: Elemen dari submatrik $J_2 = N$

$\left| V_j \right| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|}$ dan $\left| V_i \right| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|}$: Elemen dari submatrik $J_4 = L$

V_i, δ_i : Magnitude tegangan dan sudut phase tegangan pada bus i

V_j, δ_j : Magnitude tegangan dan sudut phase tegangan pada bus j

Q_i, P_i : Daya reaktif dan daya aktif pada bus i

Y_{in}, θ_{in} : Magnitude dan sudut phase admitansi pada bus i s/d n

G_{ii}, B_{ii} : Konduktansi dan suseptansi bus ke i

Setelah diperolehnya harga dari masing-masing elemen pada submatrik Jacobian maka selanjutnya dibentuk matrik Jacobian dengan menggabungkan keempat submatrik Jacobian tersebut sehingga terbentuk rumus umum untuk menghitung aliran daya dengan metoda Newton Raphson :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta |V|}{|V|} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

atau

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta |V|}{|V|} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Selanjutnya matrik Jacobian yang terbentuk diinvers dengan menggunakan metoda dekomposisi LU dan kemudian sudut phase dan magnitude tegangan tiap bus yang baru dicari dengan menggunakan rumus sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta |V|}{|V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

atau

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta |V|}{|V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

atau

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \frac{\Delta |V_2|}{|V_2|} \\ \vdots \\ \vdots \\ \frac{\Delta |V_n|}{|V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & \left| V_2 \right| \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \dots & \left| V_n \right| \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \left| V_2 \right| \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} & \dots & \left| V_n \right| \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & \left| V_2 \right| \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \dots & \left| V_n \right| \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \left| V_2 \right| \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} & \dots & \left| V_n \right| \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Hasil perkalian yang diperoleh selanjutnya dipisah-pisah menjadi bagian $\Delta \delta_i$ dan $\frac{\Delta |V_i|}{|V_i|}$ kemudian

$$\Delta \delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} |V_i|^{(k+1)} &= |V_i|^{(k)} + \Delta |V_i|^{(k)} \\ &= |V_i|^{(k)} \left(1 + \frac{\Delta |V_i|^{(k)}}{|V_i|^{(k)}} \right) \end{aligned} \quad (3.26)$$

dimana

$\Delta \delta_i$: Perubahan sudut phase tegangan bus i

$\frac{\Delta |V_i|}{|V_i|}$: Perubahan magnitude tegangan bus i

Perbedaan nilai sudut phase dan magnitude tegangan tiap bus antara yang lama dengan yang baru selanjutnya dibandingkan dengan nilai ketelitian yang telah ditentukan, jika nilai ketelitian belum tercapai maka iterasi diulangi dari awal sampai ketelitian terpenuhi dan konvergensi tercapai.

Daya pada Slack Bus selanjutnya dihitung setelah konvergensi tercapai. Adapun rumus yang digunakan adalah

$$P_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in}| V_i V_n \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (3.27)$$

$$Q_i = - \sum_{n=1}^N |Y_{in}| V_i V_n \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (3.28)$$

dimana

P_i : Daya aktif pada Slack bus

Q_i : Daya reaktif pada Slack bus

Selain itu pula daya reaktif pada Bus PV (Bus Pembangkit) juga dihitung setelah konvergensi tercapai, adapun rumus yang digunakan adalah

$$Q_i = - \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (3.29)$$

dimana

Q_i : Daya reaktif pada Bus Pembangkit I

Aliran daya antara bus dihitung dengan menggunakan rumus

$$S_{ij} = V_i (V_{ij}^* Y_{ij}^* + V_i^* Y_{ij}^* c_{ij}) \quad (3.30)$$

atau

$$P_{ij} - jQ_{ij} = V_i^* (V_i - V_j) Y_{ij} + V_i^* V_i Y_{ij} c_{ij} \quad (3.31)$$

dimana

S_{ij} : Aliran daya kompleks dari bus i ke bus j

P_{ij} : Aliran daya aktif dari bus i ke bus j

Q_{ij} : Aliran daya reaktif dari bus i ke bus j

V_i : Vektor tegangan di bus i

V_j : Vektor tegangan di bus j

V_{ij} : Vektor tegangan antara bus i dan bus j

Y_{ij} : Admitansi antara bus i dan bus j

$Y_{c_{ij}}$: Admitansi line charging antara bus i dan bus j

Rugi-rugi daya antar bus dihitung dengan menggunakan rumus

$$S_{ij}(\text{losses}) = S_{ij} + S_{ji} \quad (3.32)$$

dimana

$S_{ij}(\text{losses})$: Rugi daya kompleks dari bus i ke bus j

S_{ij} : Daya kompleks dari bus i ke bus j

S_{ji} : Daya kompleks dari bus j ke bus i

4. STUDI ALIRAN DAYA PADA SISTEM TENAGA LISTRIK PT. PLN SUMBAR-RIAU

4.1 Data Sistem Tenaga Listrik PT. PLN Sumbar-Riau

Data-data sistem tenaga listrik PT. PLN Sumbar-Riau yang terdiri dari 20 bus dengan data dan asumsi sebagai berikut :

- Faktor daya setiap bus bernilai 0.85
- Tegangan perunit untuk Slack bus 1.05 dan bus pembangkit bernilai 1.03

Selain setiap bus diberi nomor sebagai berikut :

NO	NAMA BUS	TIPE BUS
1	PLTU Ombilin	Slack Bus
2	PLTG Pauh Limo	Bus PV
3	PLTA Maninjau	Bus PV
4	PLTA Batang Agam	Bus PV
5	PLTA Singkarak	Bus PV
6	PLTA Koto Panjang	Bus PV
7	PLTD Teluk Lembu	Bus PV
8	Dumai	Bus PQ
9	Duri	Bus PQ
10	Garuda Sakti	Bus PQ
11	Bangkinang	Bus PQ
12	Payakumbuh	Bus PQ
13	Padang Luar	Bus PQ
14	Lubuk Alung	Bus PQ
15	PIP	Bus PQ
16	Batusangkar	Bus PQ
17	Indarung	Bus PQ
18	Solok	Bus PQ
19	Salak	Bus PQ
20	Simpang Haru	Bus PQ

Dengan menggunakan metoda Newton Raphson , akan disimulasikan diantaranya

1. Bagaimana pengaruh perubahan tegangan dan sudut phasa tiap bus pada sistem tenaga listrik Sumbar-Riau jika terjadi perubahan Tapping Transformator pada sistem tersebut
2. Bagaimana pengaruh perubahan tegangan dan sudut phasa pada sistem tenaga listrik Sumbar-Riau jika terjadi penambahan daya reaktif dalam bentuk pemasangan pembangkit daya reaktif berupa Kapasitor Shunt pada beberapa bus dalam sistem tersebut
3. Bagaimana pengaruh perubahan tegangan dan sudut phasa serta jumlah iterasi jika terjadi perubahan beban antara 0.5 sampai dengan 1.5 kali beban dasar pada sistem tenaga listrik Sumbar-Riau tersebut
4. Bagaimana pengaruh perubahan tegangan dan sudut phasa serta jumlah iterasi jika terdapat perbandingan R/X saluran yang kecil dan R/X saluran yang besar dari suatu sistem yang sama.

Hasil perhitungan aliran daya untuk sistem tenaga listrik PT. PLN Sumbar-Riau dengan berbagai perubahan diantaranya :

1. Jika terjadi perubahan nilai Tapping Tranformator yang terletak diantara bus 1 (PLTU Ombilin) dan bus 17 (GI Indarung), bus 2 (PLTG Pauh Limo) dan bus 20 (GI Simpang Haru), bus 3 (PLTA Maninjau) dan bus 13 (GI Padang Luar) yang mengalami penurunan masing-masing sebesar 0.985 diperoleh hasil sebagai berikut :

Hasil simulasi menunjukkan bahwa perubahan Tapping Transformator saluran antara bus 1 (PLTU Ombilin) dan bus 17 (GI Indarung), bus 2 (PLTG

Tabel 4.1 Data Nomor Tiap Bus

Pauh Limo) dan bus 20 (GI Simpang Haru), bus 3 (PLTA Maninjau) dan bus 13 (GI Padang Luar) menjadi 0.985. Akibat perubahan nilai nominal Tapping Transformator tersebut menyebabkan terjadinya perubahan magnitude tegangan dan sudut phasa pada tiap bus beban (Bus PQ) dan perubahan sudut phasa pada tiap bus pembangkit (Bus PV) dalam sistem tenaga listrik Sumbar-Riau. Perubahan nilai Tapping Transformator ini juga dapat juga dilakukan pada saluran-saluran antar bus yang lain dengan nilai nominal yang bervariasi, dimana akan memberikan perubahan terhadap sudut phasa pada bus pembangkit (Bus PV) dan perubahan magnitude tegangan dan sudut phasa pada bus beban (Bus PQ)

2. Jika Kapasitor Shunt ditambahkan pada bus 8 (GI Dumai) dan bus 9 (GI Duri) diperoleh hasil sebagai berikut :

Penambahan Kapasitor sebesar 20 MVAR pada bus 8 (GI Dumai) dan bus 9 (GI Duri) menyebabkan perubahan magnitude tegangan dan sudut phasa yang signifikan pada bus 8 (GI Dumai) dan bus 9 (GI Duri), sedangkan pada bus-bus yang lain tidak begitu besar pengaruh perubahan magnitude tegangan dan sudut phasa. Jadi dengan demikian penambahan Kapasitor Shunt pada bus akan menyebabkan kenaikan magnitude tegangan dan sudut phasa pada bus-bus yang dipasang Kapasitor Shunt.

3. Jika beban berubah yakni 0.5 dan 2.0 kali terhadap beban penuh diperoleh hasil sebagai berikut :

Hasil simulasi menunjukkan bahwa magnitude tegangan dan sudut phasa cenderung mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya beban. Adapun pengaruh penambahan beban terhadap jumlah iterasi adalah :

Tabel 4.2 Pengaruh Penambahan Beban Terhadap Jumlah Iterasi

Penambahan Beban	Iterasi
0.5 Kali	4
1.0 Kali	4
1.5 Kali	5
2.0 Kali	101

Terlihat juga bahwa perubahan beban juga berpengaruh pada banyaknya iterasi. Dengan bertambahnya beban maka iterasi yang dibutuhkan akan semakin bertambah dan waktu yang diperlukan akan semakin lama. Khusus untuk penambahan beban 2.0 Kali beban penuh hasil perhitungan aliran daya tidak bersifat konvergen.

4. Perubahan perbandingan antara R dan X dengan cara memperbesar atau memperkecil harga R pada kondisi beban yang sama (kondisi beban

penuh) memberikan pengaruh yang cukup besar terhadap jumlah iterasi sebagai berikut:

Tabel 4.3 Hasil Perbandingan Antara R dan X Terhadap Jumlah Iterasi

Perbandingan R/X	Iterasi
$R/X_{\text{baru}} = 0.5 R/X_{\text{lama}}$	4
$R/X_{\text{baru}} = 1.0 R/X_{\text{lama}}$	4
$R/X_{\text{baru}} = 1.5 R/X_{\text{lama}}$	4
$R/X_{\text{baru}} = 2.0 R/X_{\text{lama}}$	4
$R/X_{\text{baru}} = 3.0 R/X_{\text{lama}}$	5

Pada Tabel-4.3 terlihat bahwa perubahan perbandingan R/X saluran tidak begitu mempengaruhi jumlah iterasi perhitungan untuk menuju konvergen.

5. KESIMPULAN

Dari hasil pembahasan tentang studi aliran dengan metoda Newton Raphson ini dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Perubahan Tapping Transformator pada saluran di sistem tenaga listrik akan menyebabkan perubahan magnitude dan sudut phasa tegangan pada tiap bus beban (PQ) dan sudut phasa tegangan pada tiap bus pembangkit (PV).
2. Penambahan Kapasitor Shunt pada bus-bus tertentu menyebabkan perubahan magnitude tegangan dan sudut phasa tegangan yang signifikan pada bus-bus tersebut, sedangkan pada bus-bus yang lain tidak begitu besar pengaruhnya terhadap perubahan magnitude tegangan dan sudut phasa. Diman penambahan Kapasitor Shunt pada bus akan menyebabkan kenaikan magnitude tegangan dan sudut phasa pada bus-bus yang dipasang Kapasitor Shunt.
3. Perubahan beban pada sistem tenaga listrik akan berpengaruh pada banyaknya iterasi. Dengan bertambahnya beban maka iterasi yang dibutuhkan akan semakin bertambah dan begitu pula sebaliknya.
4. Perubahan perbandingan R/X saluran juga tidak begitu mempengaruhi jumlah iterasi perhitungan untuk menuju konvergen.

DAFTAR PUSTAKA

1. Gonen, Turan, “*Modern Power System Analysis*”, Jhon Wiley & Sons, Inc, Singapore, 1998.
2. Stevenson, W.D, Jr, “*Analisis Sistem Tenaga Listrik*”, diterjemahkan oleh Idris, Kemal Ir, Edisi Keempat, Erlangga, Jakarta, 1994.
3. Sianipar, Gibson, DR, Ir “*Komputasi Sistem Tenaga*”, Institut Teknologi Bandung (ITB), Bandung, 1998.
4. Gross, Charles A, “*Power System Analysis*”, Jhon Wiley & Sons, Inc, Canada, 1986.
5. Marta Yudha, Hendra, Ir, MS, “*Diktat Studi Aliran Daya*”, Universitas Sriwijaya (Unsri), Palembang, 1995
6. M.A. PAI, “*Computer Technigues in Power System Analysis*”, Indian Institute of Technology, New Delhi, 1984
7. Grainger, John & Stevenson, William, Jr, “*Power System Analysis*”, McGraw-Hill, New York, USA, 1993
8. Stagg, Glenn W, El-Abiad, “*Computer Methods in Power System Analysis*”, McGraw-Hill, Tokyo, 1981.
9. Hutauruk, Ir, Msc, “*Transmisi Daya Listrik*”, Erlangga, Jakarta, 1985
10. Gonen, Turan, “*Electric Power Transmission System Engineering Analysis And Design*”, John Wiley & Sons, California, 1988
11. Part-Enander, Eva & Sjoberg, Anders, “*The Matlab Handbook*”, John Wiley & Sons, California, 1999

LAMPIRAN

Tabel 4.4 Data Tegangan dan Tipe Bus Sistem Tenaga Listrik 20 Bus (PT. PLN Sumbar-Riau)

Bus	Tegangan pu	Jenis
1	1.0500 $\angle 0^0$	Slack
2	1.0300 $\angle 0^0$	PV
3	1.0300 $\angle 0^0$	PV
4	1.0300 $\angle 0^0$	PV
5	1.0300 $\angle 0^0$	PV
6	1.0300 $\angle 0^0$	PV
7	1.0300 $\angle 0^0$	PV
8	1.0000 $\angle 0^0$	PQ
9	1.0000 $\angle 0^0$	PQ
10	1.0000 $\angle 0^0$	PQ
11	1.0000 $\angle 0^0$	PQ
12	1.0000 $\angle 0^0$	PQ
13	1.0000 $\angle 0^0$	PQ
14	1.0000 $\angle 0^0$	PQ
15	1.0000 $\angle 0^0$	PQ

16	1.0000 $\angle 0^0$	PQ
17	1.0000 $\angle 0^0$	PQ
18	1.0000 $\angle 0^0$	PQ
19	1.0000 $\angle 0^0$	PQ
20	1.0000 $\angle 0^0$	PQ

Tabel 4.5 Data Pembangkitan Tiap Bus Sistem Tenaga Listrik 20 Bus (PT. PLN Sumbar-Riau)

Bus	Pembangkitan	
	P	Q
1	-	-
2	40.8000	-
3	68.0000	-
4	10.5000	-
5	148.7500	-
6	114.0000	-
7	48.3000	-
8	0.0000	0.0000
9	0.0000	0.0000
10	0.0000	0.0000
11	0.0000	0.0000
12	0.0000	0.0000
13	0.0000	0.0000
14	0.0000	0.0000
15	0.0000	0.0000
16	0.0000	0.0000
17	0.0000	0.0000
18	0.0000	0.0000
19	0.0000	0.0000
20	0.0000	0.0000

Tabel 4.6 Data Beban Tiap Bus Sistem Tenaga Listrik 20 Bus (PT. PLN Sumbar-Riau)

Bus	Beban	
	P	Q
1	-	-
2	34.0000	21.0720
3	17.0000	10.5356
4	0.0000	0.0000
5	4.2500	2.6339
6	8.5000	5.2680
7	76.5000	47.4120
8	25.5000	15.8040
9	17.0000	10.5360
10	85.0000	52.6800
11	26.7750	16.5942
12	0.0000	0.0000
13	42.5000	26.3400
14	25.5000	15.8040
15	42.5000	26.3400
16	8.5000	5.2680
17	51.0000	31.6080
18	17.0000	10.5360
19	17.0000	10.5360
20	71.4000	44.2512

Tabel 4.7 Data Saluran Sistem Tenaga Listrik 20 Bus(PT. PLN Sumbar-Riau)

Line		Z seri (pu)		Y/2 perunit
Dari Bus	Ke Bus	R	X	
1	17	0.0335	0.1205	0.0175
1	19	0.0013	0.0046	0.0009
2	20	0.0037	0.0132	0.0024
2	14	0.0177	0.0635	0.0105
2	15	0.0105	0.0377	0.0027
3	13	0.0220	0.0762	0.0143
6	11	0.0055	0.0330	0.0054
6	10	0.0192	0.1157	0.0229
9	8	0.0309	0.1101	0.0077
10	7	0.0068	0.0412	0.0046
10	9	0.0614	0.2184	0.0153
11	10	0.0139	0.0838	0.1865
12	4	0.5575	1.2328	0.00007
12	6	0.0321	0.1558	0.0225
13	12	0.0168	0.0580	0.0109
14	5	0.0045	0.0221	0.0033
14	3	0.0297	0.1068	0.0155
15	14	0.0072	0.0258	0.0000
17	2	0.0035	0.0125	0.0026
18	17	0.0179	0.0639	0.0093
19	18	0.0144	0.0518	0.0085

BIODATA

Heru Dibyo Laksono ST, MT, Lahir di Sawah Lunto, 7 Januari 1977, Menamatkan S1 di Jurusan Teknik Elektro Universitas Andalas (Unand) Padang tahun 2000 bidang Teknik Tenaga Listrik. Pendidikan S2 bidang Teknik Kendali dan Sistem diselesaikan di Institute Teknologi Bandung (ITB) tahun 2004. Masuk sebagai dosen Teknik Elektro Universitas Andalas sejak tahun 2005.

Reri Afrianita ST, MT, Lahir di Padang, 17 April 1977, Menamatkan S1 di Jurusan Teknik Sipil Universitas Andalas (Unand) Padang tahun 2000 bidang Struktur. Pendidikan S2 bidang Teknik Lingkungan diselesaikan di Institute Teknologi Bandung (ITB) tahun 2005. Masuk sebagai dosen Teknik Lingkungan Universitas Andalas sejak tahun 2006.